

19. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal Graphs and Manifolds, Ch. 2 in: Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques, Emilio Soria Olivas et al. (eds), IGI Global, Hershey, PA, USA, 2009, pp. 28-59.
20. Mirkes E.M. K-means and K-medoids applet. University of Leicester, 2011.
21. Adam Coates and Andrew Y.Ng. Learning Feature Representations with K-means, Stanford University, 2012.
22. Vyatchenin D.A. Nechetkie metody avtomaticheskoy klassifikatsii [Fuzzy methods of automatic classification]. Minsk: Tekhnoprint, 2004, 219 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

Лебедев Олег Борисович – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 89085135512; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

Лебедева Елена Михайловна – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 89081702418; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79282897933; the department of computer aided design; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; phone: +79085135512; the department of computer aided design; associate professor.

Lebedeva Elena Mikhaylovna – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; phone: +79081702418; the department of computer aided design; postgraduate student.

УДК 681.513.66

DOI 10.18522/2311-3103-2016-7-101114

М.Ю. Медведев, В.А. Рогов, Т.Н. Медведева

ПОЗИЦИОННО-ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С МНОГОКОНТУРНОЙ АДАПТАЦИЕЙ*

Предложена многоконтурная позиционно-траекторная система управления подвижными объектами с обеспечением астатизма и адаптивной настройкой параметров. Рассматривается задача позиционирования подвижного объекта в заданной точке. В первом контуре вычисляется управление, обеспечивающее желаемую динамику замкнутой системы и астатизм второго порядка. Во втором контуре управления осуществляется настройка параметров в соответствии с известными алгоритмами беспоисковой адаптации по эталонным моделям. При этом предлагается алгоритм настройки параметров, позволяющий сохранять заданное соотношение между корнями характеристического уравнения настраиваемой системы. Первый и второй контуры системы управления позволяют компенсировать внешние возмущения и адаптироваться к параметрическим возмущениям. В третьем контуре производится настройка параметров эталонной модели, которая позволяет изменять требования к замкнутой системе в зависимости от того, достигаются ли ограничения на управления. При достижении ограничений на амплитуду управляющих воздействий увеличиваются постоянные времени эталонного уравнения. В работе проводится исследование устойчивости замкнутой системы управления методом функций Ляпунова. Предложенные алгоритмы управления демонстрируются на примере подвижного объекта, описываемого уравнениями кинематики и динамики твердого тела. В уравнениях

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-08-00013.

динамики учитываются силы сопротивления движению. Возмущения представлены в виде линейных функций времени. Представленные результаты моделирования подтверждают корректность теоретических выводов. Предложенные алгоритмы могут также использоваться для управления траекторией движения подвижного объекта.

Позиционно-траекторное управление; адаптивное управление; подвижный объект; эталонная модель; многоконтурная адаптация.

M.Yu. Medvedev, V.A. Rogov, T.N. Medvedeva

POSITION-PATH CONTROL OF VEHICLES WITH MULTIPLE LOOP ADAPTATION

A multiple loop adaptive position-path control system is suggested. The system is astatic one. In addition adaptive parameters tuning is provided. In the article the problem of a vehicle positioning at the given point is considered. In the first loop the base control is calculated. The base control provides the closed-loop system astatic properties. In the second loop adaptation of the control system parameters is performed. The adaptation algorithm is based on the model reference adaptive control. A new algorithm of adaptation is proposed. The adaptation algorithm maintains a given ratio between the roots of the control system characteristic equation. The first loop allows compensate for external disturbances. The second loop allows adapt for parametrical disturbances. In the third loop parameters of the reference model are tuned. Parameters of reference model are changed if control reaches the given limits. In other words the system requirements are changed if control reaches the given limits. In the article the closed-loop system equilibrium stability is investigated. The function of Lyapunov is constructed for the nonlinear closed-loop system. The supposed control algorithms are applied in the control system of a vehicle described by solid body kinematics and dynamics equations. Dynamics equations consist of friction forces, gravitation force, and control force. Disturbances are presents as linear time functions. Simulation results confirm correctness of the theoretical derivations. The proposed algorithms can be applied for path control of vehicles.

Position-path control; vehicle; adaptive control; reference model; function of Lyapunov; multiple loop adaptation.

Введение. Основы адаптивного управления подвижными объектами были заложены в работах [1–3], в которых представлены методы синтеза самонастраивающихся систем. Обзор основных результатов, полученных в рамках бесперебойных адаптивных систем, представлен в работах [4, 5]. В настоящее время данный подход продолжает развиваться как в теоретическом плане [6, 7], так и в области практических приложений [8–10]. В рамках бесперебойных систем также активно развивается направление, связанное с оцениванием и компенсацией неизмеряемых внешних возмущений [11–15]. Основываясь на анализе работ по бесперебойным адаптивным системам, можно отметить, что в настоящее время наиболее полно в теоретическом плане развиты методы адаптации линейных стационарных систем. В этой связи представляют интерес вопросы использования методов адаптации линейных систем для объектов, описываемых нелинейными уравнениями.

В данной работе предлагается позиционно-траекторная система управления [16] с многоконтурной адаптацией. Метод позиционно-траекторного управления успешно применяется в последнее время в системах управления различными подвижными объектами [17, 18]. В работах [19, 20] предложен метод синтеза адаптивных позиционно-траекторных систем управления, обеспечивающий астатизм замкнутой системы и адаптацию по эталонной модели. В работе [21] этот метод применен для управления АНПА. При этом в [19–21] показано, что характеристическое уравнение замкнутой системы состоит из произведения трех многочленов, что обеспечивает независимую настройку базового регулятора, алгоритма адаптации и контура обеспечения астатизма. В данной работе развивается подход, предложенный в работах [19–21].

Ставится задача синтезировать адаптивный закон управления в виде функции координат состояния, обеспечивающий позиционирование подвижного объекта в заданной точке, парирование неизмеряемых внешних возмущений заданного класса, адаптацию к постоянным неизвестным параметрам подвижного объекта и настройку параметров эталонной модели в зависимости от ограничений на управляющие воздействия.

Позиционный регулятор с эталонной моделью. Рассматривается модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела [16]

$$\dot{y} = R(y)x, \quad \dot{x} = M^{-1}(F_u + F_d), \quad (1)$$

где y – вектор линейных и угловых координат положений подвижного объекта во внешней системе координат; x – вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат; $R(y)$ – матрица кинематики; M – матрица инерционных параметров; F_u – вектор управляющих сил и моментов; F_d – вектор прочих сил и моментов, действующих на подвижный объект. Вектор F_d может включать в себя как составляющие, зависящие от переменных состояния x и y , так и внешние возмущения.

Наряду с моделью (1) вводится в рассмотрение номинальная модель вида:

$$\dot{y}_m = R(y_m)x_m, \quad \dot{x}_m = M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \quad (2)$$

где y_m – вектор линейных и угловых координат положений номинальной модели во внешней системе координат; x_m – вектор линейных и угловых скоростей номинальной модели в связанной системе координат; $R(y_m)$ – матрица кинематики номинальной модели; F_{um} – вектор управляющих сил и моментов номинальной модели; F_{dm} – номинальный вектор прочих сил и моментов.

Матрица $R(y_m)$ и вектор F_{dm} совпадают по структуре с матрицей $R(y)$ и вектором F_d соответственно.

Синтезируем управление для номинальной модели (1). Пусть требования к установившемуся режиму номинальной модели (2) сформулированы в виде следующего уравнения

$$e_m = A_1 y_m + A_2 = 0, \quad \text{или} \quad y_m = -A_1^{-1} A_2, \quad (3)$$

где A_1 и A_2 – матрица и вектор постоянных коэффициентов. Вектор A_2 состоит из элементов, отражающих требования к точке позиционирования, а матрица A_1 принимается диагональной.

Вычислим первую и вторую производные по времени от выражения (3) в силу уравнений (2):

$$\dot{e}_m = A_1 \dot{y}_m = A_1 R(y_m) x_m, \quad (4)$$

$$\ddot{e}_m = A_1 \dot{R}(y_m) x_m + A_1 R(y_m) \dot{x}_m = A_1 \dot{R}(y_m) x_m + A_1 R(y_m) M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \quad (5)$$

Потребуем, чтобы вектор (3) удовлетворял эталонному дифференциальному уравнению

$$\ddot{e}_m + T_2 \dot{e}_m + T_1 e_m = 0, \quad (6)$$

где T_1 и T_2 – положительно определенные диагональные матрицы постоянных коэффициентов, определяющих требования к поведению номинальной модели.

Подставим выражения (3)–(5) в уравнение (6) и решим его относительно вектора управляющих сил и моментов F_{um} :

$$F_{um} = -F_{dm} + (A_1 R(y_m) M^{-1})^{-1} \{-A_1 \dot{R}(y_m) x_m - T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m\}, \quad (7)$$

В выражении (7) предполагается, что матрица $R(y_m)$ неособенная. Для твердого тела это условие сводится к тому, чтобы угол тангажа не был равен 90 градусам [22]. Также полагается, что элементы матрицы $\dot{R}(y_m)$ вычисляются на основе измерения векторов x_m и y_m в соответствии со следующим выражением

$$\dot{R}_{ij}(y_m) = \sum_k \frac{\partial R_{ij}(y_m)}{\partial y_m^k} \dot{y}_m^k = \sum_k \frac{\partial R_{ij}(y_m)}{\partial y_m^k} R_k(y_m) x_m, \quad i, j, k = \overline{1, 6}, \quad (8)$$

где $\dot{R}_{ij}(y_m)$ – элементы матрицы $\dot{R}(y_m)$; $R_{ij}(y_m)$ – элементы матрицы $R(y_m)$; y_m^k – элементы вектора y_m ; \dot{y}_m^k – элементы вектора \dot{y}_m ; $R_k(y_m)$ – k -я строка матрицы $R(y_m)$.

Уравнения (2)–(4), (7) образуют эталонную модель подвижного объекта, которая имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{y}_m = R(y_m) x_m, \\ \dot{x}_m = -(A_1 R(y_m))^{-1} (A_1 \dot{R}(y_m) x_m + T_2 \dot{e}_m + T_1 e_m). \end{cases} \quad (9)$$

Покажем устойчивость положения равновесия эталонной модели (9).

Полагая производные в левой части системы (9) равными нулю, учитывая, что из $\dot{y}_m = 0$ следует $\dot{y}_m^k = 0$, получим для установившегося режима:

$$\begin{cases} 0 = R(y_m) x_m, \\ 0 = -(A_1 R(y_m))^{-1} (T_2 (A_1 R(y_m) x_m) + T_1 (A_1 y_m + A_2)). \end{cases}$$

Учитывая, что матрица $R(y_m)$ неособенная, из последней системы получаем значения ее переменных состояния в установившемся режиме

$$x_m^* = 0, \quad y_m^* = -A_1^{-1} A_2. \quad (10)$$

Введем в рассмотрение следующую функцию

$$V_m = \frac{1}{2} e_m^T T_1^T e_m + \frac{1}{2} \dot{e}_m^T \dot{e}_m = \frac{1}{2} (A_1 y_m + A_2)^T T_1^T (A_1 y_m + A_2) + \frac{1}{2} (A_1 R(y_m) x_m)^T A_1 R(y_m) x_m. \quad (11)$$

Докажем, что функция (11) является функцией Ляпунова для эталонной модели. Производная по времени функции (11) в силу уравнений (3)–(9) равна:

$$\begin{aligned} \dot{V}_m &= e_m^T T_1^T \dot{e}_m + \dot{e}_m^T \dot{e}_m = e_m^T T_1^T \dot{e}_m + \dot{e}_m^T (-T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m) = \\ &= e_m^T T_1^T \dot{e}_m - \dot{e}_m^T T_2 \dot{e}_m - \dot{e}_m^T T_1 e_m = -\dot{e}_m^T T_2 \dot{e}_m = -(A_1 R(y_m) x_m)^T T_2 A_1 R(y_m) x_m. \end{aligned} \quad (12)$$

Из сделанного предположения о том, что матрица $R(y_m)$ неособенная, следует отрицательная полуопределенность функция \dot{V}_m . Чтобы показать отрицательную определенность функции \dot{V}_m докажем, что она обращается в нуль только в точке (10). Для этого рассмотрим три случая:

а) Пусть $\dot{e}_m = 0$. Тогда, с учетом (4), получаем

$$A_1 R(y_m) x_m = 0.$$

Продифференцируем левую и правую части этого уравнения

$$A_1 \dot{R}(y_m) x_m + A_1 R(y_m) \dot{x}_m = 0.$$

Перепишем последнее уравнение в виде

$$\dot{x}_m = (A_1 R(y_m))^{-1} (-A_1 \dot{R}(y_m) x_m).$$

Сравнивая правые части последнего уравнения и второго уравнения исследуемой системы (9), получаем

$$(A_1 R(y_m))^{-1} (-A_1 \dot{R}(y_m) x_m) = (A_1 R(y_m))^{-1} (-A_1 \dot{R}(y_m) x_m - T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m),$$

или, если $R(y_m) \neq 0$

$$-T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m = 0.$$

Так как $\dot{e}_m = 0$, то из последнего выражения получаем

$$e_m = 0, \text{ или } y_m = -A_1^{-1} A_2.$$

б) Пусть $y_m = -A_1^{-1} A_2$ ($e_m = 0$). Предположим, что $A_1 R(y_m) x_m \neq 0$ ($\dot{e}_m \neq 0$), тогда y_m должен изменяться (e_m должен стать не равным нулю), что противоречит предположению $y_m = -A_1^{-1} A_2$ ($e_m = 0$). Полученное противоречие доказывает, что $A_1 R(y_m) x_m = 0$ ($\dot{e}_m = 0$). Таким образом, в случае б) функция (12) также обращается в ноль только в точке (10).

с) Пусть $y_m = -A_1^{-1} A_2$ и $A_1 R(y_m) x_m = 0$. В этом случае из (12) получаем, что $\dot{V}_m = 0$.

Таким образом, функция \dot{V}_m (12) обращается в ноль только в точке (10), а во всех остальных точках она является отрицательной, поэтому функция (11) является функцией Ляпунова эталонной модели (9).

Проведем теперь синтез управления подвижным объектом (1).

Ошибка системы управления формируется вводится в виде

$$e = A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2, \quad (13)$$

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = A_1 y - A_1 y_m, \quad (14)$$

где z_1, z_2 – векторы дополнительных переменных, вводимых с целью обеспечения астатизма; $B_i, i = 1, 2$ – матрицы произвольно выбираемых коэффициентов.

Потребуем, чтобы ошибка системы управления e (13) удовлетворяла уравнению вида (6). Вычислим первую и вторую её производные по времени от выражения (13) в силу уравнений (1), (9), (13), (14):

$$\dot{e} = A_1 R(y) \dot{x} - A_1 R(y_m) \dot{x}_m + B_1 \dot{z}_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m), \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \ddot{e} = & A_1 \dot{R}(y) \dot{x} + A_1 R(y) \ddot{x} - A_1 \dot{R}(y_m) \dot{x}_m - A_1 R(y_m) \ddot{x}_m + \\ & + B_1 (A_1 y - A_1 y_m) + B_2 (A_1 R(y) \dot{x} - A_1 R(y_m) \dot{x}_m). \end{aligned} \quad (16)$$

Заменяя e_m на e в (6), с учетом (16), получаем следующее алгебраическое уравнение

$$\begin{aligned} A_1 R(y) \dot{x} = & -A_1 \dot{R}(y) \dot{x} + A_1 \dot{R}(y_m) \dot{x}_m + A_1 R(y_m) \dot{x}_m - \\ & - B_1 (A_1 y - A_1 y_m) - B_2 (A_1 R(y) \dot{x} - A_1 R(y_m) \dot{x}_m) - T_2 \dot{e} - T_1 e. \end{aligned}$$

Подставим в последнее уравнение выражения (9), (13), (15), раскрыв скобки и приведя подобные, получим

$$A_1R(y)\dot{x} = -(B_1A_1 + T_2B_2A_1 + T_1A_1)y - (A_1\dot{R}(y) + B_2A_1R(y) + T_2A_1R(y))x + \\ + (B_1A_1 + T_2B_2A_1)y_m + B_2A_1R(y_m)x_m - T_1B_1z_1 - (T_2B_1 + T_1B_2)z_2 - T_1A_2.$$

Подставив второе уравнение системы (2) в последнее выражение, найдем следующее выражение для вектора управляющих сил и моментов

$$F_u = -F_d + (A_1R(y)M^{-1})^{-1} \{ -(B_1A_1 + T_2B_2A_1 + T_1A_1)y - (A_1\dot{R}(y) + B_2A_1R(y) + T_2A_1R(y))x + \\ + (B_1A_1 + T_2B_2A_1)y_m + B_2A_1R(y_m)x_m - T_1B_1z_1 - (T_2B_1 + T_1B_2)z_2 - T_1A_2 \}. \quad (17)$$

Выражения (1), (9), (14), (17) представляют собой уравнения замкнутой системы управления подвижного объекта.

Структура замкнутой системы управления, представленная на рис. 1, соответствует позиционно-траекторной системе с астатизмом второго порядка, который обеспечивается введением двух интеграторов.

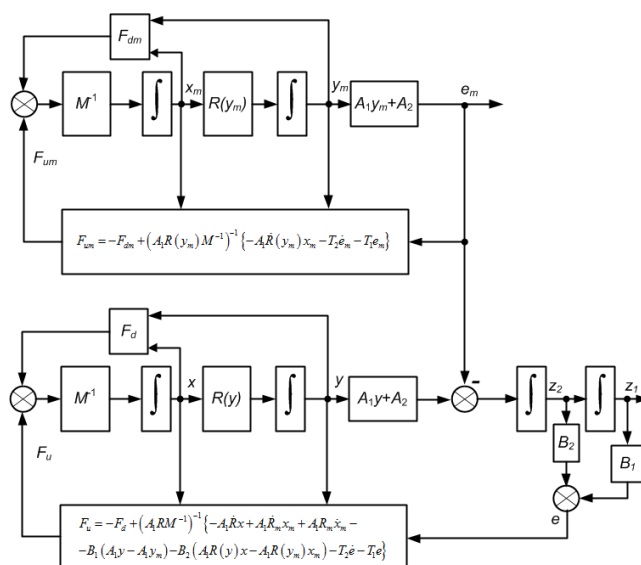


Рис. 1. Структура астатической позиционно-траекторной системы управления с эталонной моделью

Полагая производные в левой части системы (1), (9), (14), (17) равными нулю, рассмотрим установившийся режим, учитывая, что в установившемся режиме $\dot{R}(y) = \dot{R}(y_m) = 0$:

$$\begin{cases} 0 = R(y)x, \\ 0 = (A_1R(y))^{-1} \{ -(B_1A_1 + T_2B_2A_1 + T_1A_1)y - (B_2A_1R(y) + T_2A_1R(y))x + \\ + (B_1A_1 + T_2B_2A_1)y_m + B_2A_1R(y_m)x_m - T_1B_1z_1 - (T_2B_1 + T_1B_2)z_2 - T_1A_2 \}, \\ 0 = R(y_m)x_m, \\ 0 = -(A_1R(y_m))^{-1} (T_2A_1R(y_m)x_m + T_1(A_1y_m + A_2)), \\ 0 = z_2, \\ 0 = A_1y - A_1y_m. \end{cases} \quad (18)$$

Из последнего уравнения системы (18) получаем

$$y = y_m \rightarrow R(y) = R(y_m) = R. \quad (19)$$

Так как в установившемся режиме производные равны нулю, то получаем

$$\dot{y} = \dot{y}_m \rightarrow Rx = Rx_m \rightarrow x = x_m. \quad (20)$$

Подставляя (19), (20) в первые пять уравнений системы (18), находим

$$\begin{cases} 0 = Rx, \\ 0 = -T_1 A_1 y - T_2 A_1 R x - T_1 B_1 z_1 - (T_2 B_1 + T_1 B_2) z_2 - T_1 A_2, \\ 0 = Rx, \\ 0 = -T_2 A_1 R x - T_1 A_1 y - T_1 A_2, \\ 0 = z_2. \end{cases} \quad (21)$$

Выражая $T_1 A_2$ из четвертого уравнения (21) и подставляя его вместе с пятым уравнением во второе уравнение (21), получаем $0 = -T_1 B_1 z_1$. Таким образом, положение равновесия замкнутой системы управления определяется следующими выражениями:

$$y^* = y_m^* = -A_1^{-1} A_2, \quad x^* = x_m^* = 0, \quad z_1^* = z_2^* = 0. \quad (22)$$

Исследование асимптотической устойчивости положения равновесия (22) исследуется с помощью функции Ляпунова, которая в данном случае имеет вид

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} e_m^T T_1^T e_m + \frac{1}{2} \dot{e}_m^T \dot{e}_m + \frac{1}{2} e^T T_1^T e + \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{e} = \frac{1}{2} (A_1 y_m + A_2)^T T_1^T (A_1 y_m + A_2) + \\ & + \frac{1}{2} (A_1 R(y_m) x_m)^T A_1 R(y_m) x_m + \frac{1}{2} (A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2)^T T_1^T (A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2) + \\ & + \frac{1}{2} (A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m))^T (A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m)) \end{aligned} \quad (23)$$

Производная по времени функции (23) имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\dot{e}_m^T T_2 \dot{e}_m - \dot{e}^T T_2 \dot{e} = -\frac{1}{2} (A_1 R(y_m) x_m)^T A_1 R(y_m) x_m - \\ & - \frac{1}{2} (A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m))^T (A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m)). \end{aligned} \quad (24)$$

Структура функции (24) позволяет утверждать, что она является отрицательно полуопределенной. Для доказательства отрицательной определенности функции (24) нужно показать, что она обращается нуль только в точке (23).

Первое слагаемое выражения (24) совпадает с выражением (12), поэтому рассмотрим второе слагаемое. Рассмотрим три случая.

а) Пусть $e = 0$, тогда $A_1 y - A_1 y_m + B_1 z_1 + B_2 z_2 = 0$. Дифференцируя это выражение, получаем

$$A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m) = \dot{e} = 0.$$

б) Пусть теперь $\dot{e} = 0$, тогда $A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m + B_1 z_2 + B_2 (A_1 y - A_1 y_m) = 0$.

Продифференцировав последнее выражение по времени, получим

$$A_1 \dot{R} x + A_1 R \dot{x} - A_1 \dot{R}_m x_m - A_1 R_m \dot{x}_m + B_1 (A_1 y - A_1 y_m) + B_2 (A_1 R(y) x - A_1 R(y_m) x_m) = 0.$$

Подставив в это уравнение производную \dot{x} из системы (17) и проведя сокращения, получим $-T_2 \dot{e} - T_1 e = 0$. Из этого уравнения выражения в силу предположения $\dot{e} = 0$, получаем $e = 0$.

с) Пусть $e = 0$ и $\dot{e} = 0$. В этом случае из (24) получаем, что второе слагаемое \dot{V} равно нулю.

Для автоматической настройки матриц B_1 и B_2 применены алгоритмы, базирующиеся на известных результатах [8, 9]. При этом используется следующая процедура. Как показано в [18–20] в линейном приближении представленная адаптивная система описывается характеристическим уравнением вида

$$D(s) = (Is^2 + T_2s + T_1)(Is^2 + B_2s + B_1)(Is^2 + T_2s + T_1), \quad (25)$$

где I – единичная матрица.

Пусть матрицы B_1 и B_2 выбраны таким образом, что корни второго слагаемого характеристического уравнения (25) действительные и связаны между собой некоторым соотношением:

$$Is^n + B_2s + B_1 = (Is + S_1)(Is + \alpha S_1) = Is^2 + (1 + \alpha)S_1s + \alpha S_1^2.$$

где S_1 – матрица настраиваемых параметров; α – положительный постоянный коэффициент. В этом случае адаптация матриц B_1 и B_2 может осуществляться в соответствии со следующими выражениями [23]

$$\dot{s}_1 = -\gamma_1 z_1^T A_1 (y - y_m), B_1 = \alpha s_1^2, B_2 = (1 + \alpha) s_1. \quad (26)$$

Результаты численного моделирования. Рассмотрим подвижный объект, описываемый следующими матрицами кинематики и инерционных параметров

$$R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_o \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}.$$

где A, A_o – матрицы кинематики [22].

Вектор динамических сил и моментов определяется выражениями:

$$F_{dm} = F_d^0 = 0,5\rho V^2 \begin{bmatrix} -c_x & c_y & c_z & m_x l & m_y l & m_z l \end{bmatrix}^T,$$

где $c_x, c_y, c_z, m_x, m_y, m_z$ – коэффициенты сил сопротивления среды; $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность среды; V – линейная скорость объекта, м/с; $s = 0,18$ м²; $l = 3$ м; $c_x = 0,06 - 0,003V - 0,142\alpha - 0,05\beta$; $c_y = -0,0009 + 1,07\alpha + 0,31\alpha|\alpha| - 0,0077|\beta| - 0,398\beta^2$; $c_z = -1,207\beta - 0,563\beta|\beta|$; $m_x = 0,098\beta + 0,162\alpha\beta - 0,056\alpha\beta|\beta|$; $m_y = 0,071\beta + 0,042\beta|\beta|$; $m_z = 0,00058 + 0,031\alpha + 0,086\alpha|\alpha|$; ψ, J, γ – углы Эйлера; α и β – углы атаки и скольжения.

Результаты моделирования замкнутой системы управления подвижного объекта представлены на рис. 2. Параметры регулятора $T_1 = 0,25I$, $T_2 = I$, $A_1 = I$, $A_2 = -[10 \ 10 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, I – единичная матрица размерностью 6×6 . Параметры контура адаптации: $\gamma_1 = 1$; $S_1(0) = \text{diag}(3)$; $\alpha = 1$.

Неизменяемое параметрическое и внешнее возмущения

$$F_d = 0,3F_d^0 + [5 + 0,2t \quad -3 + 0,5t \quad 1 + 0,3t \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

На рис. 2,а представлено изменение во времени переменных y_{m2} и y_2 . На рис. 2,б представлено изменение параметров настройки в соответствии с выражениями (22). Увеличение начального значения $S_1(0)$ позволяет уменьшить ошибку системы управления. Однако, увеличение $S_1(0)$ и, соответственно, коэффициентов B_1 и B_2 , приводит к увеличению амплитуды управляющих воздействий, что может быть недопустимо в силу ограничений, накладываемых на управление.

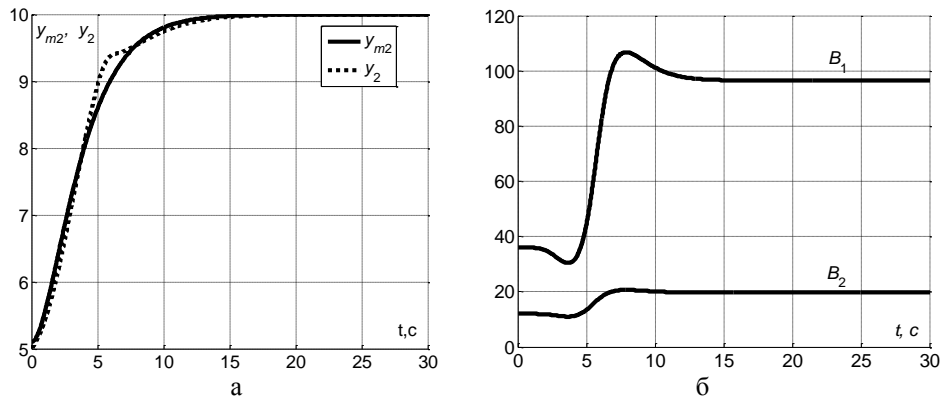


Рис. 2. Результаты моделирования адаптивной системы управления

Для того чтобы учесть ограничения, в данной работе предлагается ввести еще один контур адаптации, изменяющий параметры эталонной модели T_1, T_2 , в зависимости от амплитуды управляющих сил и моментов.

В частности, предлагается рассмотренную адаптивную систему дополнить следующими алгоритмами.

$$\text{if } abs(F_{ui}) > u_i^{\max}, \text{ mo } t_i = t_i^0 - \frac{t_i^0 - t_i^{\min}}{u_i^{\sup}} (abs(F_{ui}) - u_i^{\max}), \quad (27)$$

$$\text{if } t_i < t_i^{\min}, \text{ mo } t_i = t_i^{\min},$$

где u_i^{\max} – максимально допустимые управляющие воздействия, подаваемые на объект; t_i – параметр, определяющий собственные числа матриц T_1, T_2 ; t_i^0 – значение параметра t_i при управлениях, не превышающих ограничения; t_i^{\min} – минимальное значение параметра t_i ; u_i^{\sup} – расчетное значение управления, при котором параметр t_i достигает значения t_i^{\min} .

Рис. 3 поясняет параметры, введенные в выражении (27). На рис. 4 представлены результаты моделирования рассмотренной системы управления с алгоритмом (27) подстройки параметров эталонного уравнения (6).

На рис. 4,а представлены переменные y_{m2} и y_2 , а на рис. 4,б – коэффициенты матриц B_1 и B_2 . Сравнивая рис. 2,а и 4,а, видим, что переходный процесс в системе управления удлинился приблизительно на 20 %, однако точность отработки эталонного сигнала существенно повысилась.

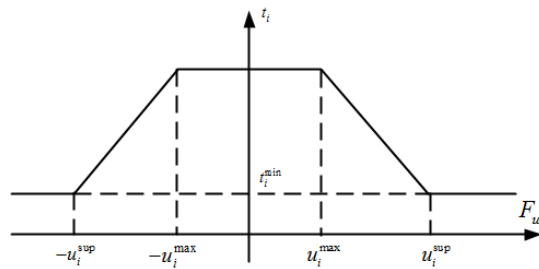
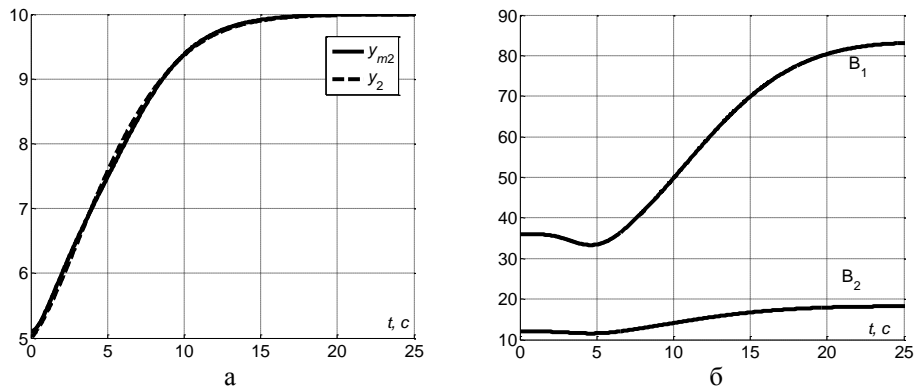
Рис. 3. Изменение параметров матриц T_1 , T_2 

Рис. 4. Моделирование адаптивной системы с изменяемым эталонным уравнением

Заключение. Предложенная процедура синтеза адаптивного управления позволяет синтезировать позиционно-траекторные алгоритмы управления подвижными объектами. В системе введено три контура. Первый контур формирует базовый алгоритм управления, обеспечивающий свойство астатизма в замкнутой системе. Второй контур обеспечивает адаптацию параметров регулятора в соответствии с заданным эталонным сигналом. Третий контур обеспечивает подстройку самого эталонного объекта в зависимости от того, достигаются ли ограничения на управляющие воздействия. Отметим, что метод позиционно-траекторного управления, являющийся развитием метода АКАР [24], и более раннего метода структурного синтеза [25], позволяет синтезировать управление нелинейными многосвязными системами. В данной статье развит метод адаптации позиционно-траекторных системы управления подвижными объектами, представленный в работах [18–20]. В отличие от работ [18–20], в данной статье проведен анализ нелинейной замкнутой системы. Кроме того, предложен новый алгоритм адаптации (22) коэффициентов матриц B_1 и B_2 , который в процессе адаптации позволяет сохранить заданное соотношение между корнями характеристического уравнения. Также предложен алгоритм (28) адаптации эталонного объекта при достижении ограничений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963). – М., 1965. – С. 46–63.

2. Рутковский В.Ю., Ссорин-Чайков В.Н. Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963). – М., 1965. – С. 93-111.
3. Zemlyakov S.D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965. New-York: P.H. Hummon Plenum Press, 1966. – P. 175-179.
4. Рутковский В.Ю. Работы института проблем управления в области беспонсковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 42-49.
5. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспонсковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7. – С. 103-121.
6. Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 8. – С. 96-108.
7. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – С. 35-44.
8. Путов В.В. Прямые и не прямые беспонсковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2007. – № 10. – С. 4-11.
9. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 5. – С. 131-146.
10. Войтицкий С.А., Феофилов С.В. Синтез адаптивной системы управления азимутального электропривода РЛС воздушного базирования // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 33-40.
11. Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 2-33.
12. Никифоров В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений. I. Объекты с известными параметрами // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 10. – С. 13-24.
13. Никифоров В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений. II. Объекты с неизвестными параметрами // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 11. – С. 40-48.
14. Бобцов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А. Стабилизация нелинейного объекта с входным запаздыванием и синусоидальным возмущающим воздействием // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 1. – С. 21-30.
15. Ильин Е.Д., Ширяев В.И. О гарантированном оценивании возмущений в линейных динамических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 9. – С. 12-16.
16. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk, A.R., Gurenko B.V. Control system design for autonomous underwater vehicle // Proceedings – 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013. – P. 77-82. doi: 10.1109/LARS.2013.61.
18. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
19. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 219-225.
20. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 66-74.
21. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Адаптивное позиционное управление подвижными объектами, не линеаризуемыми обратной связью // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 8. – С. 523-529.

22. Бюшгенс Г.С., Студнев П.В. Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
23. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.
24. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
25. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.

REFERENCES

1. Rutkovskiy V.Yu., Krutova I.N. Printsip postroeniya i nekotorye voprosy teorii odnogo klassa samonastravayushchikhsya sistem s model'yu [The principle of construction and some questions of the theory of one class of self-adjusting systems with a model], *Samonastravayushchiesya avtomaticheskie sistemy: Trudy I Vsesoyuznoy konferentsii po teorii i praktike samonastravayushchikhsya sistem (10–14 dekabrya 1963)* [Self-adjusting automatic systems: proceedings of the I all-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems (from 10 to 14 December 1963)]. Moscow, 1965, pp. 46-63.
2. Rutkovskiy V.Yu., Ssorin-Chaykov V.N. Samonastravayushchiesya sistemy s probnym signalom [Plug and play system with the test signal], *Samonastravayushchiesya avtomaticheskie sistemy: Trudy I Vsesoyuznoy konferentsii po teorii i praktike samonastravayushchikhsya sistem (10–14 dekabrya 1963)* [Self-adjusting automatic systems: proceedings of the I all-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems (from 10 to 14 December 1963)]. Moscow, 1965, pp. 93-111.
3. Zemlyakov S.D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system, *Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965*. New-York: P.H. Hummon Plenum Press, 1966, pp. 175-179.
4. Rutkovskiy V.Yu. Raboty instituta problem upravleniya v oblasti bespoiskovykh adaptivnykh sistem i sistem upravleniya kosmicheskimi apparatami [The work of the Institute of management in the field of analytical ADAP policymaking systems and the systems of spacecraft control], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1999, No. 6, pp. 42-49.
5. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu. O nekotorykh rezul'tatakh razvitiya teorii i praktiki primeneniya bespoiskovykh adaptivnykh sistem [On some results of development of the theory and practice of searchless adaptive systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2001, No. 7, pp. 103-121.
6. Rutkovskiy V.Yu., Glumov V.M., Sukhanov V.M. Fizicheski realizuemyy algoritm adaptivnogo upravleniya s etalonnoy model'yu [Physically implemented algorithms of adaptive control with reference model], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2011, No. 8, pp. 96-108.
7. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu. Algoritm funktsionirovaniya adaptivnoy sistemy s etalonnoy model'yu, garantiruyushchiy zadannuyu dinamicheskuyu tochnost' upravleniya nestatsionarnym dinamicheskim ob'ektom v usloviyakh neopredelennosti [The algorithm of functioning of an adaptive system with a reference model that guarantees a given dynamic precision control of nonstationary dynamic object in conditions of uncertainty], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2009, No. 10, pp. 35-44.
8. Putov V.V. Pryamye i nepryamye bespoiskovyye adaptivnye sistemy s mazhoriruyushchimi funktsiyami i ikh prilozheniya k upravleniyu mnogostepennymi nelineynymi uprugimi mekhanicheskimi ob'ektami [Direct and indirect analytical adaptive systems with magierowski functions and their applications to the management of suffrage nonlinear elastic mechanical objects], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2007, No. 10, pp. 4-11.
9. Glumov V.M., Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M. Primenenie printsipa postroeniya adaptivnykh sistem s etalonnoy model'yu k zadacham monitoringa tekushchego sostoyaniya transmisionnykh valov [The application of the principle of construction of adaptive systems with reference model to the task of monitoring the current state of the transmission shafts], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2003, No. 5, pp. 131-146.

10. Voytitskiy S.A., Feofilov S.V. Sintez adaptivnoy sistemy upravleniya azimutal'nogo elektroprivoda RLS vozdušnogo bazirovaniya [Synthesis of adaptive control system of the azimuthal electric radar-based air], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2014, No. 4, pp. 33-40.
11. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Metody adaptivnogo upravleniya neli-neynymi ob"ektami po vykhodu [Methods for adaptive control of nonlinear objects in the output], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1996, No. 2, pp. 2-33.
12. Nikiforov V.O. Nablyudateli vneshnikh determinirovannykh vozmushcheniy. I. Ob"ekty s izvestnymi parametrami [Observers of external deterministic disturbances. I. Objects with known parameters], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2004, No. 10, pp. 13-24.
13. Nikiforov V.O. Nablyudateli vneshnikh determinirovannykh vozmushcheniy. II. Ob"ekty s neizvestnymi parametrami [Observers of external deterministic disturbances. II. Objects with unknown parameters], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2004, No. 11, pp. 40-48.
14. Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Pyrkin A.A. Stabilizatsiya nelineynogo ob"ekta s vkhodnym zapazdyvaniem i sinusoidal'nym vozmushchayushchim vozdeystviem [Stabilization of nonlinear plant with input delay and the sinusoidal perturbation effects], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2015, No. 1, pp. 21-30.
15. Il'in E.D., Shiryaev V.I. O garantirovannom otsenivanii vozmushcheniy v lineynykh dinamicheskikh sistemakh [On guaranteed estimation of disturbances in linear dynamic systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2014, No. 9, pp. 12-16.
16. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of mobile objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V. Control system design for autonomous underwater vehicle, *Proceedings – 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013*, pp. 77-82. doi: 10.1109/LARS.2013.61.
18. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektorного upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: algoritmy upravleniya [The system of position-trajectory control of work-measured aeronautical platform: control algorithms], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2013, No. 7, pp. 13-20.
19. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kpukhmalev V.A. Bazovye algoritmy adaptivnogo pozitsionno-traektorного upravleniya podvizhnymi ob"ektami ppi pozitsionirovanii v tochke [The basic adaptive algorithms of position-trajectory control of mobile objects, when positioned at the point], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2015, Vol. 16, No. 4, pp. 219-225.
20. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektorный sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Adaptive algorithms of position-trajectory control systems of mobile objects], *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2015, No. 4, pp. 66-74.
21. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Adaptivnoe pozitsionnoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami, ne linearizuemymi obratnoy svyaz'yu [Adaptive position control of movable objects that are not feedback linearizable], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2015, Vol. 16, No. 8, pp. 523-529.
22. Byushgens G.S., Studnev R.V. Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie [The dynamics of the aircraft. Spatial movement]. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 320 p.
23. Aleksandrov A.G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy: ucheb. Posobie [Optimal and adaptive systems: manual]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 263 p.
24. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p.
25. Boychuk L.M. Metod strukturnogo sinteza nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [The method of structural synthesis of nonlinear automatic control systems]. Moscow: Energiya, 1971, 112 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Глебов.

Медведев Михаил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Рогов Владимир Александрович – e-mail: v_rogoff@mail.ru; кафедра электротехники и мехатроники; инженер.

Медведева Татьяна Николаевна – e-mail: tnikmedv@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; магистрант.

Medvedev Mikhail Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Rogov Vladimir Alexandrovich – e-mail: v_rogoff@mail.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; engineer.

Medvedeva Tat'yana Nikolaevna – e-mail: tnikmedv@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; undergraduate student.

УДК 004.032.26

DOI 10.18522/2311-3103-2016-7-114122

В.Н. Гридин, В.И. Солодовников

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ КРИПТОСТОЙКОСТИ И МЕТОДОВ КРИПТОАНАЛИЗА НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ

Предпосылкой использования нейронных сетей в качестве математической основы при создании новых методов криптографической защиты информации может служить их способность к восстановлению искаженных сигналов и распознаванию объектов, имеющих характеристики отличные от эталонных. Дополнительным преимуществом является аппаратная реализуемость нейросетевых алгоритмов, что позволяет увеличить скорость шифрования и дешифрования данных. Одной из основных проблем, мешающих продвижению нейросетевых методов шифрования, является плохая изученность вопросов их криптостойкости, что делает актуальной задачу исследования характерных особенностей и поиска уязвимостей нейросетевых криптографических алгоритмов. В статье исследуются вопросы применения нейронных сетей для криптографической защиты информации. Были предложены алгоритмы шифрования, дешифрования и предварительной обработки данных. Алгоритм шифрования основан на генерации различных вариантов искаженного кода, который может быть восстановлен и классифицирован используемой сетью с заданными характеристиками. При построении нейронной сети учитывается информация о частоте появления символов исходного алфавита, что в дальнейшем затрудняет применение методов частотного криптоанализа. Алгоритм дешифрования заключается в распознавании элементов поступающего на вход сети шифротекста и на выходе пользователь получает набор исходных символов. Таким образом, предлагаемый алгоритм принадлежит к симметричным шифрам, так как ключом шифрования и дешифрования является сама нейросеть, а именно выбранная парадигма, ее параметры и структурные характеристики. В статье осуществляется построение математической модели нейросетевого алгоритма симметричного шифрования, а также отмечено его сходство с шифром пропорциональной замены, но с характерными особенностями, присущими методам нейросетевой обработки информации. Проведен анализ классических методов криптоанализа и их применимость по отношению к нейросетевому алгоритму. Предложены возможные направления криптоанализа, а также способы улучшения криптостойкости. Дополнительно осуществляется попытка сопоставить терминологию, принятую при работе с нейросетевыми алгоритма-